Biodiversité, seuils de tolérance des écosystèmes, résilience et dégradation des forêts

I. Thompson

Suivre certains principes écologiques en matière de gestion forestière peut renforcer la résilience des forêts à long terme et contribuer à l'adaptation au changement climatique.

Les forêts comprennent de multiples écosystèmes associés à une grande diversité de conditions édaphiques et microclimatiques se déclinant à travers de vastes paysages. La composition et la nature des écosystèmes forestiers varient au cours du temps, en fonction des perturbations naturelles et des changements du régime climatique. Cependant, elles demeurent plus ou moins les mêmes dans les limites d'une variation naturelle (voir la figure), considérée comme état stable. Dans un *état stable*, une forêt peut produire une série de biens et services représentant une valeur pour les hommes.

C'est la biodiversité qui sous-tend la plupart des biens et services environnementaux; et de nombreuses forêts tropicales en particulier maintiennent des niveaux élevés de biodiversité. La perte de biodiversité est susceptible d'avoir des conséquences négatives considérables sur la capacité productive des forêts (voir Thompson *et al.*, 2009; Bridgeland *et al.*, 2010; Cardinale *et al.*, 2011) et la fourniture de biens et services. Aussi, dans la mesure où la dégradation des forêts peut être définie comme la perte de l'aptitude de celles-ci à produire les biens et services attendus (par exemple, FAO, 2009), la perte de biodiversité constitue un critère majeur pour mesurer cette dégradation. La conservation de la biodiversité est donc une pierre angulaire de la gestion durable des forêts (voir Processus de Montréal, 2009) et un facteur clé pour le maintien du fonctionnement des écosystèmes forestiers.

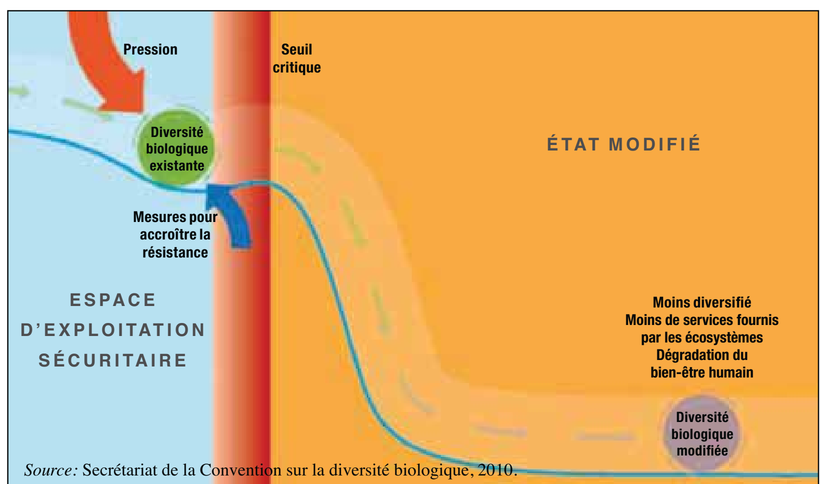
Cet article explore les façons dont les forêts maintiennent leurs états stables au fil du temps et expose ce qui se passe lorsque les perturbations dépassent les capacités des mécanismes naturels de récupération. Il décrit comment la gestion durable des forêts, notamment la conservation de la biodiversité, est essentielle pour appuyer les mécanismes de remise en état des forêts, et présente les principes écologiques pouvant être appliqués à la gestion forestière.

RÉSILIENCE ET RÉSISTANCE

Définitions

Une caractéristique importante des forêts est leur *résilience*, à savoir leur

Illustration des points de basculement, ou seuils, des écosystèmes



Source: Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, 2010.

Ian Thompson, Chercheur scientifique, travaille pour le Service canadien des forêts à Sault Ste. Marie, Ontario, Canada.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

capacité de se rétablir suite à des perturbations importantes (voir Gunderson, 2000). Dans le cadre de la plupart des régimes de perturbations naturelles, les forêts maintiennent leur résilience dans le temps. La résilience d'une forêt est une propriété émergente d'un écosystème qui résulte de la biodiversité à de multiples échelons, allant de la diversité génétique à la diversité paysagère (Thompson *et al*., 2009). Pour être en mesure de fournir les biens et services que les hommes tirent des forêts, les écosystèmes forestiers doivent pouvoir se rétablir après avoir subi des perturbations et ne pas se dégrader dans le temps.

Lié au concept de *résilience*, se trouve celui de *résistance*, à savoir la capacité d'une forêt de résister à des perturbations mineures au cours du temps, comme la mort de quelques arbres ou un niveau chronique d'herbivorie de la part d'insectes. Les forêts sont en général stables et changent peu suite à des perturbations non catastrophiques. Les changements mineurs sont atténués, comme cela advient lorsque les trouées dans le couvert forestier créées par la mort d'arbres individuels ou de petits groupes d'entre eux sont rapidement à nouveau comblées par de jeunes arbres. Les forêts peuvent aussi se montrer résistantes à certains changements environnementaux, tels que l'évolution des tendances météorologiques au cours du temps, du fait d'une redondance au sein des espèces ayant un rôle fonctionnel (la *redondance* désigne la superposition ou la duplication des fonctions écologiques assumées par un groupe d'espèces, voir Mécanismes) (Díaz et Cabido, 2001).

Des écosystèmes peuvent être hautement résilients mais peu résistants à une perturbation donnée. Ainsi, de nombreuses forêts boréales ne sont pas particulièrement résistantes au feu, mais sont fortement résilientes à l'égard de ce dernier et se rétablissent d'habitude complètement au bout d'un certain nombre d'années. En général, la plupart des forêts naturelles, tout particulièrement les forêts primaires anciennes, sont à la fois résilientes et résistantes à diverses sortes de changements. La perte de résilience peut être causée par la perte de groupes fonctionnels (voir Mécanismes et Points de basculement) résultant de mutations environnementales tels qu'un changement climatique à grande échelle, une mauvaise gestion forestière ou une altération suffisamment vaste ou continue des régimes des perturbations naturelles (Folke *et al*., 2004).

Mécanismes

Selon toute évidence, la résilience d'une forêt est étroitement liée à la biodiversité se manifestant normalement dans l'écosystème (voir Folke *et al*., 2004; Thompson *et al*., 2009). En particulier, certaines espèces et certains groupes d'espèces remplissent des fonctions clés dans les forêts et sont donc essentiels pour que celles-ci soient en mesure de conserver l'ensemble de leurs processus fonctionnels (Díaz et Cabido, 2001). Ainsi, les oiseaux prédateurs permettent de contenir le nombre d'insectes présents dans une forêt, réduisant les probabilités que la pression d'herbivorie de la part de ces derniers atteigne des niveaux catastrophiques, et accroissant ainsi la productivité des arbres (voir Bridgeland *et al*., 2010). Les pollinisateurs, notamment divers types d'insectes, chauve-souris et oiseaux, sont aussi d'excellents exemples d'espèces hautement fonctionnelles dans les écosystèmes, et sans eux, de nombreuses plantes ne pourraient pas se reproduire. La résilience d'une forêt dépend largement de ces espèces clés et des fonctions qu'elles remplissent, ainsi que de la façon dont elles recommencent à se développer au fur et à mesure que la forêt se rétablit après les perturbations, en particulier les perturbations liées à des interventions de gestion forestière.

Sur le plan génétique, la capacité de résilience réside dans l'aptitude d'une espèce à persister au sein d'une série de variables environnementales, par exemple en tolérant divers niveaux de températures ou un certain degré de sécheresse. Au niveau des espèces, il existe divers types de réponses comportementales et fonctionnelles susceptibles d'aider une espèce à repeupler une zone perturbée ou à réagir à des changements environnementaux. En outre, les processus d'assemblage d'un écosystème reflètent considérablement le réservoir d'espèces disponibles du paysage (voir Tylianakis *et al*., 2008) de même que la connectivité de ce dernier. À l'échelle du paysage, l'hétérogénéité des blocs forestiers peut être une mesure de redondance entre espèces et constituer une source de végétaux pionniers qui sont susceptibles, quand la forêt commence à se développer à nouveau ou à se rétablir après une perturbation, de permettre aux communautés



FAO/A. YANCHUK

Forêt feuillue composée principalement de trembles dans la forêt boréale du Canada septentrional. Les forêts peuvent ne pas être particulièrement résistantes à certaines perturbations auxquelles elles sont pourtant résilientes

Forêt dégradée de genévrier (Juniperus thurifera) dans le Haut-Atlas, Maroc



de converger vers les types caractérisant la forêt d'origine. Ainsi, réfléchir à la question de la résilience implique nécessairement de prendre en compte aussi bien les petites que les grandes échelles.

Perte de résilience et dégradation des forêts

L'état d'un écosystème est défini par sa composition botanique (arbres) dominante et la structure de peuplement attendue pour un peuplement donné. Le changement d'état d'une forêt résulte d'une perte de résilience, se traduisant par un passage partial ou complet vers un type d'écosystème différent de ce que l'on pourrait attendre dans la zone considérée. Une telle évolution conduit à une réduction de la production de biens et de services. Par conséquent, le «changement d'état d'un écosystème» peut être retenu comme indicateur de la dégradation. Par exemple, si une forêt est censée être mixte mais est en revanche dominée par un tout petit nombre d'espèces, ou bien si on s'attend à observer un couvert forestier dense et que l'on se trouve face à une forêt ouverte ou à une savane, c'est qu'il y a eu un changement d'état. De tels changements d'état doivent être considérés comme négatifs, dans la mesure où ils dégradent la forêt du point de vue de la biodiversité comme de la production, et affectent en général le niveau des biens et services disponibles.

Souvent, la dégradation des forêts provient de l'emploi de mauvaises techniques d'exploitation durant une certaine période. Cependant, les forêts peuvent se dégrader pour de nombreuses raisons autres que l'abattage. Par exemple, certaines forêts peuvent apparaître intactes alors que la plupart des espèces animales de grande taille leur font défaut, du fait d'une pratique abusive de la chasse (voir Redford, 1992). Cela pourrait avoir des conséquences à long terme pour la santé de ces forêts, comme un accroissement de l'herbivorie de la part des insectes du fait de l'absence de contrôle des prédateurs, ou comme une diminution de la dissémination des graines, autant de fonctions qui auraient été remplies par les animaux manquants. Autre exemple de dégradation, l'établissement réussi d'une espèce envahissante qui a pris le dessus sur des espèces endémiques, restreignant ainsi les biens fournis par l'écosystème.

Dans chacun des cas décrits, si les changements sont suffisamment accusés pour provoquer une changement d'état, la mesure dans laquelle une forêt a été dégradée peut être déterminée grâce à la télédétection. Ainsi, utilisant des données satellite, Souza *et al*. (2003) ont pu cartographier les forêts amazoniennes du Brésil ayant été excessivement brûlées ou lourdement exploitées et brûlées, et Strand *et al*. (2007) ont signalé plusieurs cas où la télédétection a été employée pour effectuer le suivi de forêts affectées par des espèces d'arbres et d'insectes envahissantes dans diverses régions du monde.

POINTS DE BASCULEMENT

Les forêts peuvent ne pas toujours se rétablir suite à des perturbations graves et prolongées. Des seuils existent pour les populations d'espèces individuelles et pour les processus individuels au sein des écosystèmes, et en dernier ressort pour les écosystèmes eux-mêmes. Le point auquel un écosystème perd sa capacité de récupération, ou auquel sa résilience et son intégrité sont perdues, est désigné comme *point de basculement*, ou *seuil écologique*. Si les perturbations sont trop importantes, il s'ensuivra des effets en cascade se traduisant par des changements marqués dans l'écosystème forestier, et conduisant en dernier lieu la forêt vers un nouvel état. Par exemple, une sécheresse et des incendies sévères peuvent convertir une forêt sèche en savane, voire en prairie. Le plus souvent, le nouvel état fournira aux hommes un niveau moins élevé de produits et de services.

Les points de basculement peuvent être atteints rapidement ou bien être l'aboutissement d'un changement chronique annulant la capacité de récupération d'un écosystème, par exemple au travers de la diminution graduelle des espèces au cours du temps. Ainsi, le morcellement des forêts est un processus qui ouvre une brèche dans les forêts continues au travers de multiples perturbations. Une forêt peut aisément tolérer quelque perte de continuité spatiale tout en conservant ses espèces et ses fonctions, mais des études montrent que certains degrés de morcellement constituent en réalité des points de basculement, marqués par une perte de la biodiversité et des fonctions forestières et une diminution de la capacité de produire des biens et services (voir Andrén, 1994; Arroyo-Rodríguez *et al*., 2007).

Les écosystèmes peuvent être utilisés et exploités pour leurs services mais le recours à ces derniers ne peut pas dépasser les niveaux garantissant leur durabilité, de même que les biens issus de la forêt ne peuvent pas être prélevés d'une façon susceptible de détruire les processus écosystémiques (voir la figure). Une fois qu'un point de basculement est atteint, les changements affectant l'écosystème sont importants et non linéaires, souvent imprévisibles,



Montagnes de l'Himalaya oriental, Inde. La biodiversité est à la base de la résilience d'une forêt et représente une question clé pour les responsables de gestion forestière

et le plus souvent dramatiques (voir Scheffer et Carpenter, 2003). Ainsi, certaines zones d'Afrique du Nord ont subi une mutation plutôt spectaculaire, passant de la forêt sèche au désert en raison du changement climatique advenu dans la région (Kröpelin *et al.*, 2008). Malheureusement, souvent nous ne reconnaissons un point de basculement qu'une fois qu'il a été atteint et que les conséquences en général négatives pour l'écosystème sont devenues évidentes. Par conséquent, gérer une forêt de manière durable requiert d'apprendre à identifier à l'avance les points de basculement possibles.

Considérations sur le changement climatique

Le changement climatique global surplombe les nombreux autres impacts des activités humaines sur les écosystèmes forestiers, ce qui rend l'identification des points de basculement d'autant plus incertaine. Le climat a une influence décisive sur les rythmes de respiration et de production forestiers ainsi que sur d'autres processus, œuvrant par le biais de la température, du forçage radiatif (augmentation de l'énergie demeurant dans l'atmosphère) et des régimes hydriques, sur le moyen et le long termes. Le climat et les conditions météorologiques influencent de même directement les processus à court terme intervenant dans les forêts, tels que les incendies, l'herbivorie et la migration des espèces.

Au fur et à mesure que le climat global changera, les écosystèmes forestiers changeront aussi car il se peut que le seuil de tolérance physiologique de certaines espèces soit dépassé et que les rythmes de nombreux processus biophysiques forestiers soient altérés (voir Scholze *et al.*, 2006). La plupart des études suggèrent que de nombreuses forêts tropicales ne seront pas résilientes face au changement climatique sur le long terme si la tendance actuelle et prévue, marquée par une diminution des précipitations et un accroissement de la sécheresse, se poursuit (voir Betts, Sanderson et Woodward, 2008; Malhi *et al.*, 2008).

Les écosystèmes forestiers se composent de regroupements distincts d'espèces. À travers les diverses régions, les zones de répartition de chacune d'entre elles reflètent les niches physiologiques et écologiques qui leur correspondent; et, à leur tour, les niches reflètent les lieux où les conditions environnementales sont les plus favorables. Ainsi, des espèces dotées d'une grande tolérance physiologique pourraient être extrêmement résilientes, y compris à un changement climatique significatif. De même, des espèces liées à des niches écologiques apparemment étroites pourraient se révéler plus résilientes qu'il n'y paraît, si les nouvelles conditions leur fournissent un avantage aux dépens de compétiteurs. Dans chacune de ces deux situations potentielles, cette aptitude s'appliquerait à des espèces ayant des réserves génétiques suffisamment vastes et variables pour pouvoir s'adapter, et la capacité de pouvoir migrer. Cependant, cela n'est pas le cas pour de nombreuses espèces. Là où la taille des populations et/ou la diversité génétique ont été réduites, ou bien là où la mobilité des espèces est restreinte par la perte d'habitat et le morcellement ou est naturellement faible, une adaptation autonome réussie aux mutations environnementales devient moins probable. Les populations pourraient être condamnées à l'extinction si elles sont exposées à un rythme de changement environnemental excédant le rythme auquel elles peuvent s'adapter, ou celui auquel les individus peuvent se disséminer (voir Schwartz *et al.*, 2006).

Dans les négociations sur le changement climatique relatives aux forêts, l'accent a surtout été mis sur la gestion de ces derniers en vue d'atténuer les effets du changement climatique, tandis que la question de l'adaptation a reçu moins d'attention. L'adaptation des forêts au changement climatique consiste avant tout dans le maintien de leur résilience, même si les types d'écosystèmes sont appelés à changer. Et si les écosystèmes changent effectivement, il est essentiel de comprendre comment répondre à cela à travers la gestion forestière. Dans la plupart des cas, certaines formes actives de gestion seront nécessaires pour permettre aux forêts de s'adapter au changement climatique. Conserver la résilience des forêts peut ainsi constituer un mécanisme important, tant pour atténuer les effets du changement climatique que pour s'adapter à celui-ci.

GÉRER LES FORÊTS POUR ÉVITER D'ATTEINDRE LES SEUILS CRITIQUES

Une gestion forestière durable est une gestion écosystémique des forêts ayant pour une large part comme objectif sous-jacent de favoriser le maintien de la résilience naturelle. L'une des tâches essentielles en matière de gestion consiste à aider les forêts à se rétablir après la récolte de bois ou d'autres produits, en faisant en sorte que les propriétés de l'écosystème perdurent sur le long terme. Au cours des dernières années, cette tâche s'est singulièrement compliquée du fait de la pression supplémentaire exercée par le changement climatique sur les écosystèmes terrestres. Tandis qu'une gestion forestière appropriée et saine sur le plan biologique consiste essentiellement à conserver la résilience des forêts, faire face au changement climatique requiert une planification et une action supplémentaires. Si nous comprenons mieux les écosystèmes et sommes en mesure de prévoir précisément quels niveaux d'exploitation peuvent correspondre à des seuils, la gestion des biens et services issus des forêts peut se révéler de nature plus bénigne.

Maintien de la biodiversité

Le maintien de la biodiversité est essentiel si l'on veut préserver la résilience des forêts et éviter d'atteindre des points de

basculement. Étroitement liée à l'écosystème, la diversité biologique d'une forêt en sous-tend la productivité, la résilience, la résistance et la stabilité dans le temps et l'espace. Une réduction de la biodiversité dans les systèmes forestiers a des implications claires, souvent négatives, sur leur fonctionnement et sur la quantité de biens et services que ces systèmes sont en mesure de produire.

Comprendre comment la biodiversité contribue à la résilience et à la résistance des forêts locales peut fournir des clés importantes pour l'amélioration de la gestion forestière. Ainsi, tandis qu'il est relativement simple de planter des arbres et de produire un peuplement ligneux à court terme, la remise en état d'un écosystème est bien plus ardue. Le manque de diversité à tous les niveaux (gène, espèce de flore ou de faune, et paysage) dans les plantations forestières simples réduit la capacité de résilience et de résistance aux perturbations, altère l'approvisionnement en nombreux biens et services que l'écosystème est susceptible de fournir et rend ce dernier vulnérable aux perturbations catastrophiques. Grâce à l'application de principes de gestion écologiques, les plantations forestières peuvent fournir bien plus qu'un simple peuplement d'arbres, et les écosystèmes forestiers peuvent être rétablis, en même temps que les capacités productives relatives au produit choisi sont renforcées (voir Parrotta et Knowles, 1999; Brockerhoff *et al*., 2008).

Comprendre les seuils

Les écosystèmes forestiers changent continuellement en réponse aux pressions environnementales de court et long terme, ce qui se traduit par une variation intrinsèque au fil du temps. En conséquence, les indicateurs de leurs fonctions, tels que la production de certains biens, fluctuent de même dans le temps. Aussi les seuils devraient-ils être perçus comme une fourchette de valeurs tenant compte à la fois de cette fluctuation et de l'incertitude statistique inhérente à une compréhension insuffisante du fonctionnement des écosystèmes. En vue d'éviter la dégradation des écosystèmes forestiers, il est essentiel que les responsables de gestion forestière aient une connaissance de base de la façon dont la biodiversité locale est liée à la productivité, et des niveaux de perturbation que les écosystèmes concernés sont en mesure de tolérer.

Actions suggérées

Lorsque la forêt se modifie suite à une coupe ou à une attaque d'insectes, ou bien en raison du changement climatique ou d'autres événements météorologiques extrêmes, les aménagistes doivent se soucier de ramener la forêt dans des conditions lui permettant de fournir les biens et services qui étaient attendus d'elle. Comprendre l'écologie forestière locale, sur laquelle devra s'appuyer la gestion durable de la forêt, et comprendre la façon dont la forêt est susceptible de changer en réaction au changement climatique, constituent un aspect essentiel de tout plan se proposant de maintenir le flux de biens et services forestiers. Les actions suggérées ci-après ont été élaborées à partir de principes écologiques visant à maintenir et à renforcer la résilience forestière à long terme, et notamment à favoriser l'adaptation des forêts au changement climatique:

1. Planifier en vue de maintenir la biodiversité à chaque échelon de la forêt (peuplement, paysage, région) et pour tous les éléments (gènes, espèces, communautés), en s'appuyant sur une compréhension des seuils et des conditions climatiques futures attendues. Cela signifie qu'il est essentiel de faire reposer les actions sur des connaissances spécialisées et des principes écologiques permettant de conserver la biodiversité pendant et après l'exploitation forestière.
2. Maintenir la diversité génétique des forêts grâce à des pratiques de gestion qui ne visent pas uniquement à sélectionner certains arbres et à les exploiter, sur la base du type de site, du taux de croissance et de la supériorité de la forme.
3. Ne réduire les populations d'aucune espèce d'arbre à l'échelon du paysage à un niveau où l'auto-remplacement devient impossible.
4. Maintenir la complexité structurelle des peuplements et des paysages en utilisant les forêts naturelles comme modèles et points de repère. Lorsqu'ils œuvrent à la gestion forestière, les responsables devraient essayer de reproduire les processus et la composition que l'on trouve dans les peuplements naturels, en termes de composition des espèces et structure des peuplements, en utilisant des méthodes de sylviculture qui tiennent compte des types de perturbations naturelles les plus importantes.
5. Maintenir la connectivité au sein des paysages forestiers en réduisant le morcellement, en restaurant des habitats perdus (types de forêts) et en étendant les réseaux d'aires protégées. Les forêts intactes sont plus résilientes que les forêts morcelées aux perturbations, notamment au changement climatique.
6. Maintenir la diversité fonctionnelle (et la redondance des espèces) et réduire la conversion de forêts naturelles diversifiées en plantations monotypiques ou à espèces réduites.
7. Réduire la compétition non naturelle en contrôlant les espèces envahissantes (ainsi que leurs voies d'accès), et éviter que les projets de plantation, boisement et reboisement s'appuient sur des espèces d'arbres étrangères.
8. Réduire l'éventualité d'évolutions négatives en effectuant dans certaines zones des interventions de régénération assistée, qui consistent à planter des arbres issus de régions et climats s'approchant des conditions attendues à l'avenir. Par exemple, dans des zones pour lesquelles il est prévu qu'elles deviendront plus sèches, envisager de planter des espèces d'arbres ou des individus de provenances susceptibles d'être plus résistantes à la sécheresse que les espèces et provenances locales, en portant une attention particulière aux espèces régionales.
9. Protéger les populations d'espèces isolées ou disjointes, telles que celles qui vivent aux marges de leur zone de répartition naturelle, en tant que possibles habitats d'origine futurs. Ces populations pourraient représenter des réservoirs génétiques adaptés à l'avance à répondre au changement climatique et pourraient former des populations noyaux au fur et à mesure que les conditions changent.
10. S'assurer qu'il existe des réseaux nationaux et régionaux d'aires protégées exhaustives et représentatives, ayant été établies sur la base

de principes judicieux et scientifiques. Intégrer ces réseaux dans les planifications nationales et régionales portant sur la connectivité du paysage à grande échelle.

11. Développer un plan de suivi opérationnel fournissant des données sur les perturbations naturelles, les conditions climatiques et les conséquences des actions de gestion forestière et des opérations sylvicoles. Adapter les plans futurs et les pratiques de mise en œuvre en fonction des exigences.

L'aptitude à conserver, utiliser durablement et restaurer les forêts réside dans notre compréhension et notre interprétation des tendances et processus à divers niveaux, dans notre capacité de reconnaître les seuils et dans notre habileté à traduire ce savoir en des actions appropriées et adaptatives de gestion forestière. ◆



Références

Andrén, H. 1994. Effects of habitat fragmentation on birds and mammals in landscapes with different proportions of suitable habitat: a review. *Oikos*, 71(3): 355–366. DOI: 10.2307/3545823.

Arroyo-Rodríguez, V., Aguirre, A., Benítez-Malvido, J. et Mandujano, S. 2007. Impact of rain forest fragmentation on the population size of a structurally important palm species: *Astrocaryum mexicanum* at Los Tuxtlas, Mexico. *Biological Conservation*, 138(1–2): 198–206. DOI: 10.1016/j.biocon.2007.04.016.

Betts, R., Sanderson, M. et Woodward, S. 2008. Effects of large-scale Amazon forest degradation on climate and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363: 1873–1880. DOI: 10.1098/rstb.2007.0027.

Bridgeland, W.T., Beier, P., Kolb, T. et Whitham, T.G. 2010. A conditional trophic cascade: birds benefit faster growing trees with strong links between predators and plants. *Ecology*, 91: 73–84. DOI: 10.1890/08-1821.1.

Brockerhoff, E.G., Jactel, H., Parrotta, J.A., Quine, C.P. et Sayer, J. 2008. Plantation forests and biodiversity: oxymoron or opportunity? *Biodiversity and Conservation*, 17(5): 925–951. DOI: 10.1007/s10531-008-9380-x.

Cardinale, B.J., Matulich, K.L., Hooper, D.U., Byrnes, J.E., Duffy, E., Gamfeldt, L., Balvanera, P., O'Connor, M.I. et Gonzalez, A. 2011. The functional role of producer diversity in ecosystems. *American Journal of Botany*, 98(3): 572–592. DOI: 10.3732/ajb.1000364.

Díaz, S. et Cabido, M. 2001. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends in Ecology y Evolution*, 16(11): 646–655. DOI: 10.1016/S0169-5347(01)02283-2.

FAO. 2009. *Vers une définition de la dégradation des forêts: analyse comparative des définitions existantes.* par M. Simula Évaluation des ressources forestières – Document de travail 154. Rome (disponible aussi sur: www.fao.org/docrep/012/k6217f/k6217f00.pdf).

Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L. et Holling, C.S. 2004. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35: 557–581. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711.

Gunderson, L.H. 2000. Ecological resilience: in theory and application. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 31: 425–439. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.31.1.425.

Kröpelin, S., Verschuren, D., Lézine, A.-M., Eggermont, H., Cocquyt, C., Francus, P., Cazet, J.-P., Fagot, M., Rumes, B., Russell, J.M., Darius, F., Conley, D.J., Schuster, M., von Suchodoletz, H. et Engstrom, D. R. 2008. Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: the past 6000 years. *Science*: 320(5877): 765–768. DOI: 10.1126/science.1154913.

Malhi, Y., Roberts, J.T., Betts, R.A., Kileen, T.J., Li, W. et Nobre, C.A. 2008. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319(5680): 169–172. DOI: 10.1126/science.1146961.

Montreal Process [Processus de Montréal]. 2009. *Criteria and indicators for the conservation and sustainable management of temperate and boreal forests*, quatrième édition. Disponible sur: www.rinya.maff.go.jp/mpci/2009p_4.pdf.

Parrotta, J.A. et Knowles, O.H. 1999. Restoration of tropical moist forest on bauxite-mined lands in the Brazilian Amazon. *Restoration Ecology*, 7(2): 103–116. DOI: 10.1046/j.1526-100X.1999.72001.x.

Redford, K.H. 1992. The empty forest. *BioScience*, 42(6): 412–422. DOI: 10.2307/1311860.

Scholze, M., Knorr, W., Arnell, N.W. et Prentice, L.C. 2006. A climate-change risk analysis for world ecosystems. *Proc. National Acad. Sciences*, 103: 13116–13120.

Scheffer, M. et Carpenter, S.R. 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(12): 648–656. DOI: 10.1016/j.tree.2003.09.002.

Schwartz, M.W., Iverson, L.R., Prasad, A.M., Matthews, S.N. et O'Connor, R.J. 2006. Predicting extinctions as a result of climate change. *Ecology*, 87(7): 1611–1615. DOI: 10.1890/0012-9658(2006)87[1611:PEAARO]2.0.CO;2.

Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique. 2010. *Perspectives mondiales de la diversité biologique 3*. Montréal, Canada. Disponible sur: www.cbd.int/gbo3.

Souza, C. Jr., Firestone, L., Silva, L.M. et Roberts, D. 2003. Mapping forest degradation in the Eastern Amazon from SPOT4 through spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, 87(4): 494–506. DOI: 10.1016/j.rse.2002.08.002.

Strand, H., Höft, R., Strittholt, J., Miles, L., Horning, N., Fosnight, E., et Turner, W., éds. 2007. *Sourcebook on remote sensing and biodiversity indicators*. Technical Series n° 32. Montréal, Canada, Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique.

Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S. et Mosseler, A. 2009. *Forest resilience, biodiversity, and climate change: a synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems*. Technical Series n° 43. Montréal, Canada, Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique.

Tylianakis, J.M., Rand, T.A., Kahmen, A., Klein, A.-M., Buchmann, N., Perner, J. et Tscharntke, T. 2008. Resource heterogeneity moderates the biodiversity-function relationship in real world ecosystems. *PLoS Biology*, 6(5): e122. DOI: 10.1371/journal.pbio.0060122. ◆